专题：中国能源发展战略研究
Study on China’s Energy Development Strategy

引用格式：王国法，刘合，王丹丹，等. 新形势下我国能源高质量发展与能源安全. 中国科学院院刊，2023, 38(1): 23-37, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20221028001.
Wang G F, Liu H, Wang D D, et al. High-quality energy development and energy security under the new situation for China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 23-37, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20221028001. (in Chinese)

新形势下我国能源高质量发展与能源安全

王国法[1,2,3*]　刘　合[4]　王丹丹[3]　庞义辉[5]　吴立新[6]

1 中国煤炭科工集团有限公司　北京　100013
2 煤炭科学研究总院　北京　100013
3 北京天玛智控科技股份有限公司　北京　101399
4 中国石油勘探开发研究院　北京　100083
5 中煤科工开采研究院有限公司　北京 100013
6 煤炭工业规划设计研究院有限公司　北京　100120

摘要　能源安全是国家安全与稳定发展的基石，能源高质量发展是国家经济长期增长的基本保障。文章分析俄乌冲突、美国能源统治和我国能源消费增长刚性需求等复杂国内外形势影响，以及我国能源转型发展的不确定性，总结其对我国能源发展和能源安全的战略要求；立足我国能源结构和资源禀赋，建立以化石能源为基础的自主可控、安全可靠的综合能源保障体系，发展多渠道能源开发和能源储备，制定支撑能源转型低碳发展的战略思路和技术路线；提出建立现代能源与矿业治理体系平台及拓扑图和构成：5G能源专网、能源与矿业大数据人工智能处理平台、区块链能源与矿业产业协作监管平台、省级和国家级监管中心，推进建立能源产业全方位安全观与现代能源矿业治理体系，为我国能源高质量发展和能源安全提供保障。

关键词　能源安全，高质量发展，综合能源保障体系，全方位安全观，能源与矿业治理

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20221028001

当前世界处于百年未有之大变局中，国际关系复杂多变，世界各国正面临较大能源安全问题[1]，当前国际形势也增大了我国能源进口风险。我国能源结构决定了煤炭是我国能源安全的“压舱石”。国内煤炭能源分布西多东少、北富南贫的地域分布特点明显，煤炭价格区域性差异大，煤炭行业发展仍存在不平衡

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金重点资助项目（51834006），国家重点研发计划项目（2017YFC0804304）
修改稿收到日期：2022年12月21日

和不充分。

能源高质量发展是保持国家经济持续平稳增长的需求，更是保障国家能源安全的必行之路[2-7]。在新形势下，我国专家学者和行业单位对国家能源高质量和能源安全的具体路径开展了积极的研究[4]。本文深入剖析我国能源高质量发展和能源安全面临的新形势和新要求；将现代信息技术与能源开发技术深度融合，建立以化石能源为基础的自主可控、安全可靠综合能源保障体系，支撑能源转型和低碳发展；强化能源产业全方位安全观，推动构建现代能源与矿业治理体系，有效应对国家能源问题，保障我国能源安全[8-11]。

1 我国能源高质量发展和能源安全面临新形势、新要求

当前国际形势诡异多变，俄乌冲突复杂持续，对全球能源与矿业体系产生较大冲击；美国由能源独立转向谋求能源统治，在俄乌冲突中美国能源获利与欧洲能源窘境形成鲜明对比，警示能源安全的极端重要性。我国经济持续高质量发展和中等消费群体增加，能源消费的刚性需求不断提升；油气进口保供风险叠加、新能源发展与技术局限性，为我国能源安全提出新要求。

1.1 国内外环境错综复杂，对保障国家能源安全提出新的更高要求

1.1.1 俄乌冲突长期化、复杂化，对全球能源体系影响深远

煤、油、气供需错位，价格飙升。布伦特原油期货价格最高涨至 139 美元/桶，较俄乌冲突爆发前（2022 年 2 月 23 日）上涨 39%。全球液化天然气（LNG）期货价格飙升并长时间处于高位（图 1）。全球出现“抢煤潮”，欧洲阿姆斯特丹、鹿特丹、安特卫普等港口 2022 年 7 月均价约 380 美元/吨，同比增长超 350%。

全球能源贸易流向改变。欧洲油气进口转向美国，2022 年 1—5 月进口美国原油约 2 877 万吨，1—6月进口美国 LNG 2 700 万吨，超过 2021 年全年进口量；俄罗斯向中国、印度扩大能源出口，1—8 月俄罗斯原油出口至中国同比增长 47% 至 2 790 万吨，煤炭增长 25% 至 3 500 万吨。

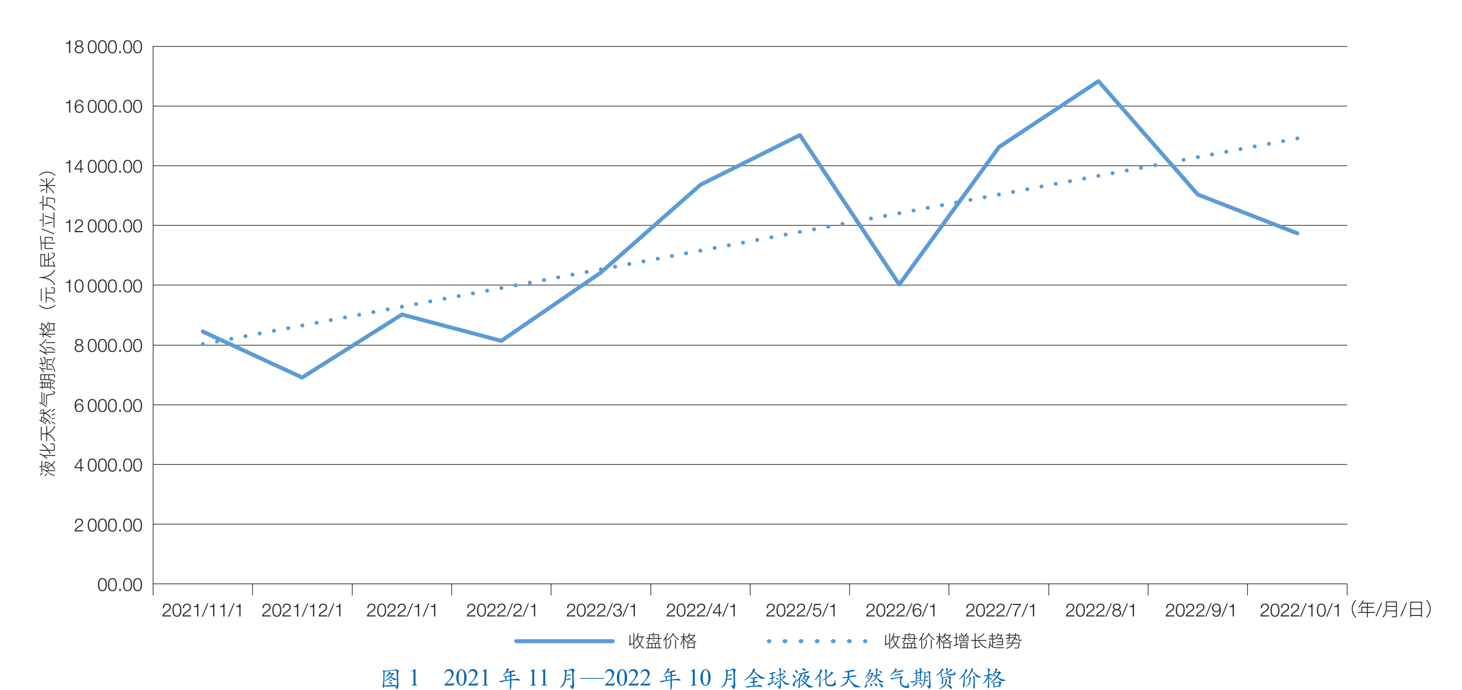


图 1　2021 年 11 月—2022 年 10 月全球液化天然气期货价格

Figure 1　Global liquefied natural gas futures prices from November 2021 to October 2022

西方国家制裁加大了俄罗斯能源产量不确定性，国际能源供给缺口短期难以弥补。俄罗斯经济发展部预计2022年俄罗斯石油产量将同比下降9.3%至4.753亿吨；天然气产量下降5.6%至7 209亿立方米；原油出口量同比下降1.2%至2.283亿吨。同时，石油输出国组织（OPEC）等增产意愿不足，安哥拉、尼日利亚等国能力有限，难寻快速稳定替代资源。欧盟能源供应结构多元化（图2），但俄罗斯是欧盟最大的能源供应国（图3），俄罗斯能源供应不确定将严重影响欧盟的源供给。

西方国家能源绿色低碳转型面临多重挑战。2021年，欧盟是俄罗斯主要能源出口国，天然气、煤炭和原油占比分别高达45%、46%和27%；其与俄罗斯的冲突导致欧洲出现严重能源危机，欧洲国家不得不重启煤电，而欧洲计划的能源转型将面临生存与发展的悖论。

1.1.2 美国能源牟利与欧洲能源短缺，警示能源安全的极端重要性

美国从危机中频频获利，谋求能源统治。2022年上半年，美国LNG出口量平均为3.17亿立方米/天，成为全球最大LNG出口国，近几年美国LNG出口量持续增高（图4）；美欧达成协议，2022年美国对欧洲的天然气出口将增加2/3，并将在2027年前助欧洲摆脱对俄能源依赖；美国成功抢夺欧洲能源市场，并将能源安全与地缘政治绑定。欧洲天然气期货结算价格不断飙升，意味着脱离俄罗斯能源供应将大幅提高欧洲各国能源代价。

欧洲油气安全面临进口来源与进口代价两难。俄罗斯与欧盟存在紧密的能源相互依存关系，欧洲短期内难以实现能源完全脱俄，并且未来将进一步加剧与亚洲能源争夺，欧洲可能被迫承受地区溢价。

1.1.3 我国要求高质量保障实体经济对能源消费增长的刚性需求

多地电力供应短时紧张，一定程度影响经济运行。2021年1月—9月，我国发电需求短时快速增加、新能源出力有限、煤价高位多因素叠加（图5），7月—9月煤炭缺口达3 900多万吨（图6）；8月西南地区极端高温干旱天气、用电负荷激增、水电量减半，影响生产生活。

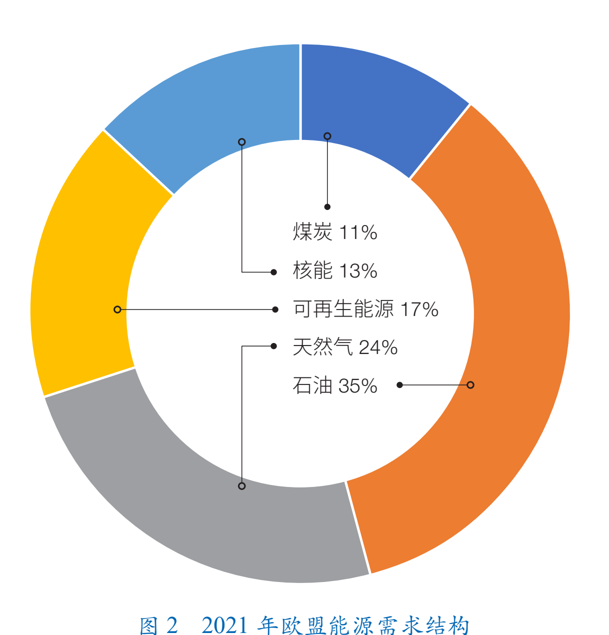


图2　2021年欧盟能源需求结构
Figure 2　European Union energy demand structure in 2021

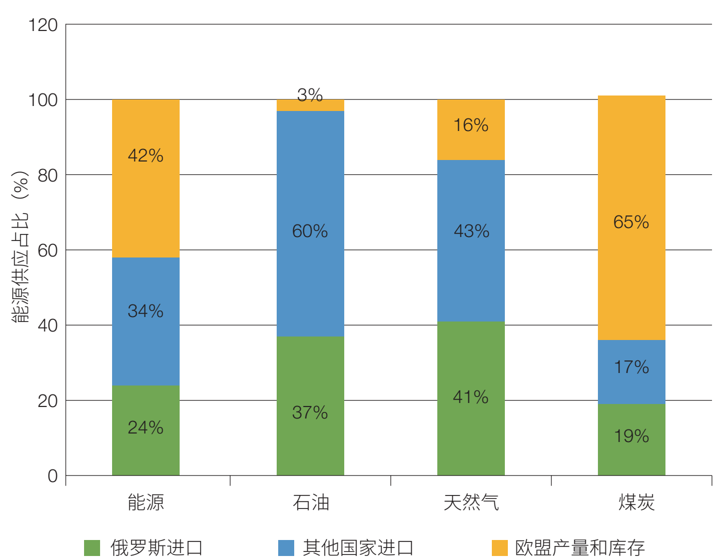


图3　2021年欧盟能源供应结构
Figure 3　European Union energy supply structure in 2021

美国LNG总出口量 美国LNG出口波兰的量 美国LNG出口法国的量
美国LNG出口西班牙的量 美国LNG出口葡萄牙的量 美国LNG出口荷兰的量
美国LNG出口量（亿立方米）
120 100 80 60 40 20 0
2016/1/1 2016/4/1 2016/7/1 2016/10/1 2017/1/1 2017/4/1 2017/7/1 2017/10/1 2018/1/1 2018/4/1 2018/7/1 2018/10/1 2019/1/1 2019/4/1 2019/7/1 2019/10/1 2020/1/1 2020/4/1 2020/7/1 2020/10/1 2021/1/1 2021/4/1 2021/7/1 2021/10/1 2022/1/1 2022/4/1 2022/7/1 2022/10/1
（年/月/日）

图 4　2016 年 1 月—2022 年 10 月美国液化天然气（LNG）总出口量及其出口到部分欧洲国家的情况

Figure 4　Total export volume of LNG from January 2016 to October 2022 in the United States and its export to some European countries

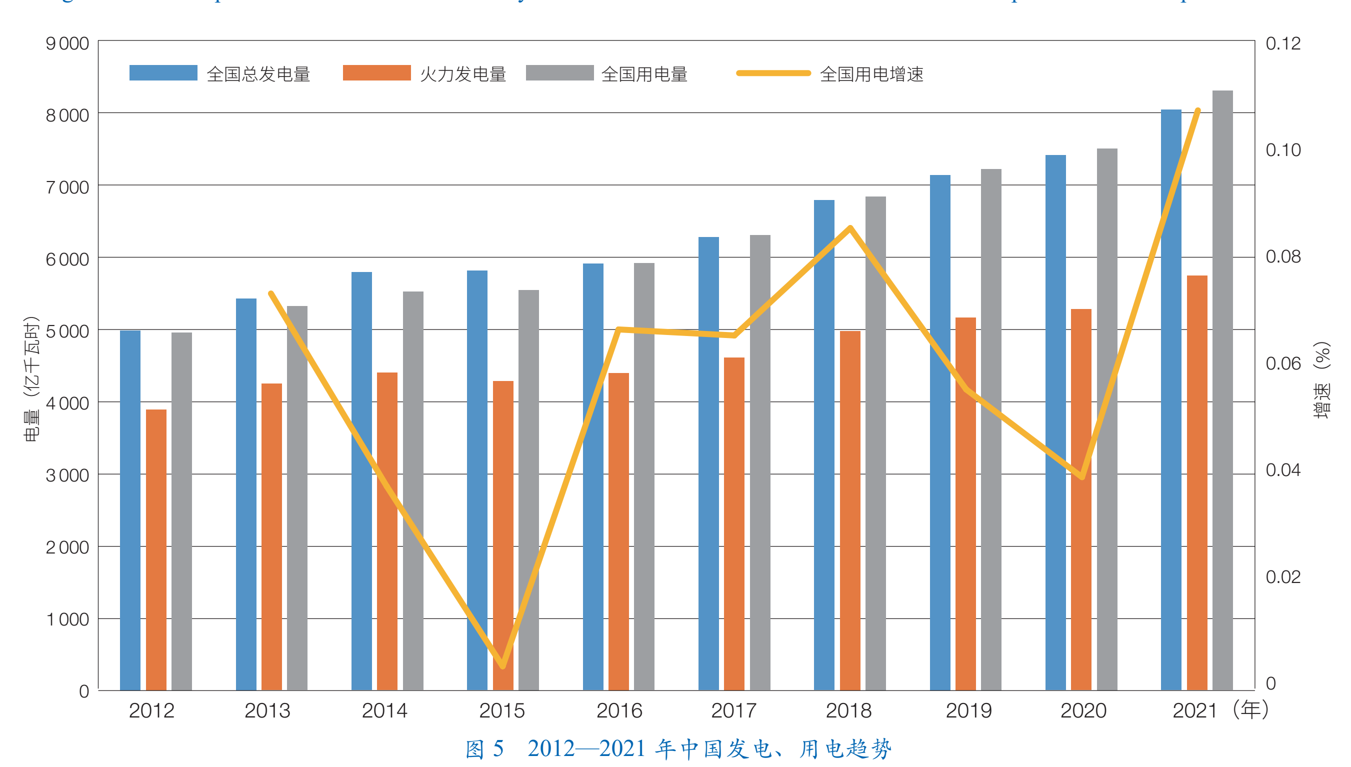


图 5　2012—2021 年中国发电、用电趋势

Figure 5　Trends of power generation and consumption in China from 2012 to 2021

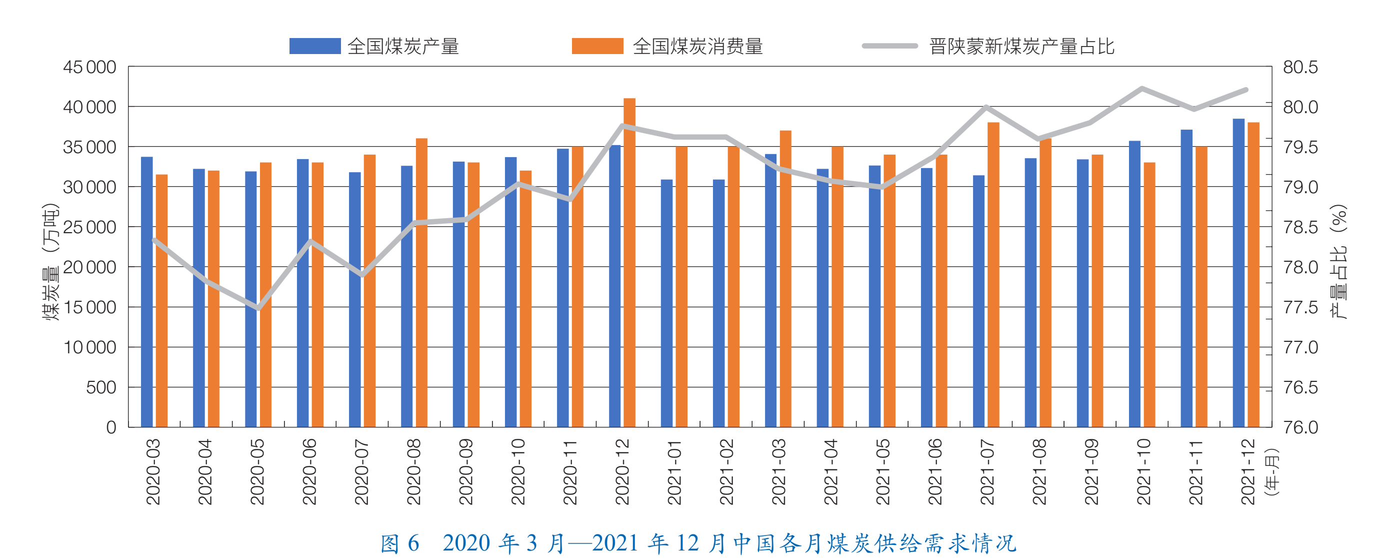


图 6　2020 年 3 月—2021 年 12 月中国各月煤炭供给需求情况
Figure 6　Monthly coal supply and demand in China from March 2020 to December 2021

新能源尚不能成为“去煤化”后的能源主体。新能源装机容量大幅增长，较 2015 年实现翻番（2021 年 10 月底达 10.02 亿千瓦），但其对气候敏感性提高，对调峰需求、基础能源的安全保障要求更高。

1.2 我国能源转型发展的不确定性增加

1.2.1 能源的刚性需求与油气进口保供风险叠加

经济中高速发展带来能源需求持续增长。预计 2022—2025 年，全国能源消费总量年均增速约为 3.3%，2025 年达到 59.4 亿吨标煤；其中，煤炭消费量将保持年均 2.07% 的增长，天然气消费量年均消费增速在 5.2%—6.7%，石油的消费量也将进一步增大[12]。

油气进口保供面临多重挑战。2021 年，我国石油产量 1.99 亿吨，石油对外依存度 72.05%；我国天然气产量为 2 053 亿立方米，天然气对外依存度 44.9%。国际能源价格暴涨，进口成本大增。我国油气进口来源地主要集中在地缘政治不稳定地区，海上运输通道必经霍尔木兹海峡和马六甲海峡。在大国博弈背景下，我国获取境外油气资源的外部环境可能恶化，海上通道存在被封锁风险，将对我国经济社会发展造成不可估量的影响。

1.2.2 新能源发展与技术经济局限性

新能源电力装机能力快速增加，受多种因素影响，尚难成为“去煤化”后的能源主体。可再生能源电力供应面临挑战，光伏、风力、水力发电受气候因素影响较大，在大规模储能技术尚未获得有效突破的前提下，难以实现稳定可靠供给。新能源大规模接入，对电网形成较大冲击，使得电网需要为风、光发电系统建设相应的旋转备用和无功补偿以解决调峰调频及对电压进行有效的控制和调整。

1.2.3 “去煤化”带来经济高风险

盲目“去煤化”将制约新能源发展。越是大力发展新能源，可靠的调峰电源在电力系统中的作用就越大。盲目“去煤化”将会影响区域社会稳定，会提高人民生活成本和企业成本[1]；并且，煤电大幅度退出，难以保障电力系统的安全稳定运行。目前，全国具有灵活调节能力的电源不足 20%，难以适应新能源大规模发展和系统调节需求。对煤电进行灵活性改造可有效支撑风电、光伏等波动性电源大规模接入并网，助力构建新型电力系统，突破灵活性电源之殇。

煤电是保障新能源稳定发展的兜底能源。从发达国家的能源发展实践看，在碳达峰后主要依靠天然气发电的灵活性，来解决新能源的不稳定性、间歇性。

我国天然气对外依存度高达45%，不具备大力发展天然气发电保障能源供应的条件。基于我国能源资源禀赋和系统成本，在当前的技术条件和装机结构下，煤电依旧是最经济可行、安全可靠的电力系统保障能源。

1.2.4 美国和西方集团设计的“低碳陷阱”

美国和西方国家的低碳目标具有双重标准。美国、欧盟、日本、俄罗斯、印度等世界主要经济体能源消费仍以化石为主，占比高达80%（图7）。西方国家碳达峰是自然达峰，碳达峰和能源达峰、工业化进程的完成处在同一时期[13]；发展中国家实现工业化和经济增长需要突破碳排放的约束。发达国家用“低碳”遏制发展中国家发展，针对中国意图十分明显——企图用碳税等设计打压中国和新兴经济体的制造成本优势。美国、加拿大、韩国等国的人均碳排放基本是中国的2倍，当前仍进行奢侈性碳排放。美国能源转型是以油气替代煤炭为主体能源，可再生能源主要是对增量的替代，而发展中国家已经开始进行发展性碳排放。

碳排放对气候变化的影响仍需商榷。气候变化预测非常复杂，受资助研究者开发的全球气候模拟预测模型不能解释过去更不能预测未来气温变化。二氧化碳（CO_2）对气候的影响是科学假说并不是科学结论[14]。然而，政客施压，利益集团随风起舞；一些机构提出的危言耸听的观点值得商榷。此外，美国、英国、德国多位科学家提出地球气温与太阳辐射之间具有很强的相关性。

1.3 我国能源发展战略要求

1.3.1 全面准确理解“双碳”目标

能源安全位列六大安全之前列，是国家安全的基石；能源安全是能源转型的前提条件。立足我国能源资源禀赋，尊重能源发展规律，先立后破是实施“双碳”目标的基本原则。“双碳”目标是国际承诺，也是国家战略。

针对2021年下半年的“拉闸限电”，政府及时调整政策，强调基于以煤为主的能源资源禀赋，扩产保供，平稳保障全国各行业和居民用电。煤炭作为可以清洁高效利用的最经济安全的能源和原材料，在下个百年内仍将扮演重要角色。

1.3.2 明确能源高质量发展与能源安全战略要求

坚持化石能源清洁化和新型能源低碳化发展方向，建设自主可控、安全可靠能源保障体系，推动我

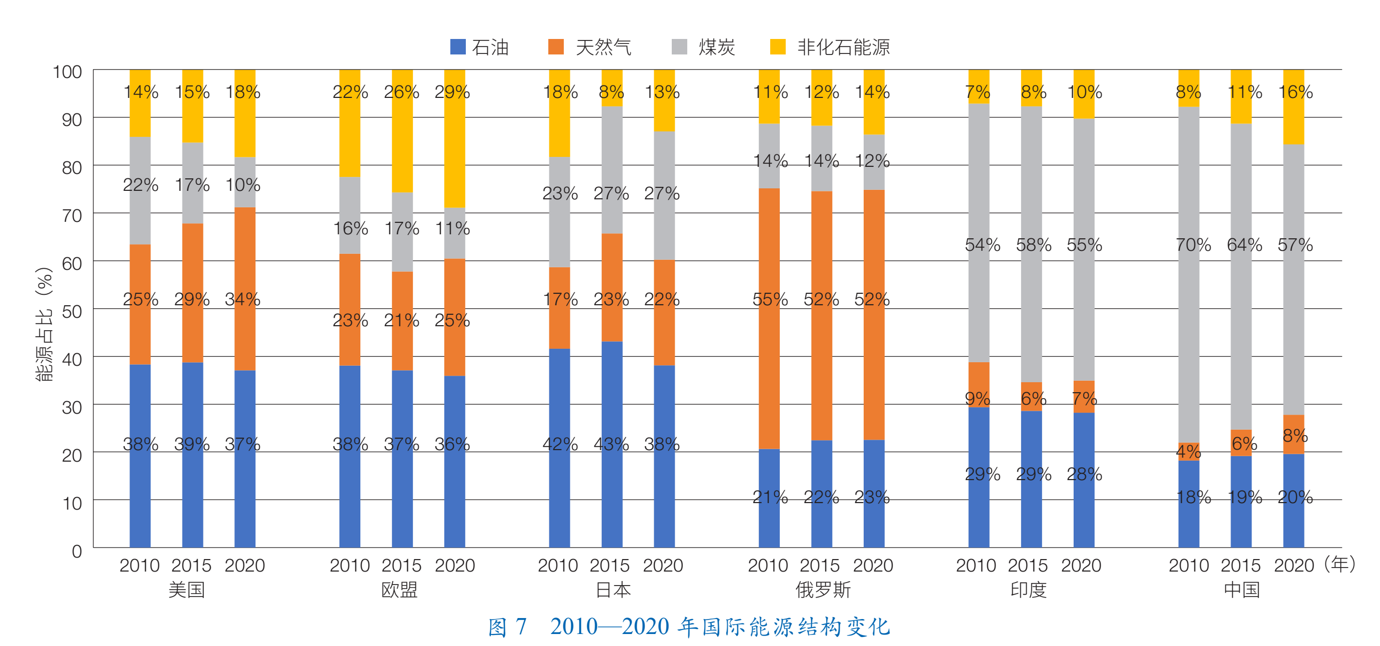


图7 2010—2020年国际能源结构变化

Figure 7 Changes in international energy structure from 2010 to 2020

国能源高质量发展，保障能源安全。支持煤炭智能化开发和清洁高效利用；石油增储上产，提高采收率；大力发展天然气，增加储备；建设智能电网，发展大功率电池和储能技术；积极筹划、稳步推进氢能发展；提高核能安全利用；积极发展可再生能源，解决弃风、弃光、弃水等问题。

2 强化以化石能源为基础的自主可控综合能源保障体系

为应对我国能源安全面临的各种挑战，形成自主可控的综合能源保障体系，应构建安全可靠、自主可控的煤、油、气、电综合能源系统；推进煤炭智能绿色开发与柔性供给体系建设，一方面加强油气稳定供应与战略储备，另一方面增强煤制油气战略替代能力建设，并规划多能协同绿色低碳发展技术布局路线。

2.1 建设安全可靠、自主可控的综合能源系统

优化煤、油、气、非化石等各种能源的组合比例，因地制宜、统筹开发，建立传统能源与非化石能源协同开发和煤电油气热等一体化供应的综合能源系统（图 8），实现能源综合梯级利用，满足多种用能需求。

以 5—10 年内显著提升我国可再生能源水平为目标，制定多能协同、绿色低碳发展技术路线：① 开展多能互补、协同高效的综合能源系统耦合关键技术研发，如研究煤、油、气、非石化多能协同互补及用能智能调控技术；② 夯实基础理论研究，如新型高效低成本风电基础理论、多能互补协同高效的综合能源系统耦合理论模型、新型晶体硅电池低成本高质量产业化制造技术、热化学转化和热化学储能材料、氢能高效低成本制备；③ 开展煤炭煤电与新能源协同发展关键技术的研发及示范工程，如研制超临界发电技术高温材料、灵活智能超高参数燃煤发电技术、燃煤机组洁净化发电技术、可再生能源与燃煤机组互补高效运行调控及深度调峰技术，开展井上下可再生能源开发系统与储能示范；④ 开展煤、油、气、新能源耦合发展关键技术研发及示范工程，如强化煤油共炼生产工艺技术、煤油共加氢制芳烃的高效催化剂工艺及关键技术、煤化工与绿电绿氢耦合发展技术工艺装备、新能源与煤炭原位热解协同开发技术、新能源制氢与煤转化耦合等理论与技术、CO_2 与氢气（H_2）制取液体燃料、一步法合成化工品技术。

充分发挥煤炭对综合能源系统的支撑调节和兜底保障作用，增强油气供应能力、战略储备和调节能力，推动煤电向基础保障性和系统调节性电源并重转型。

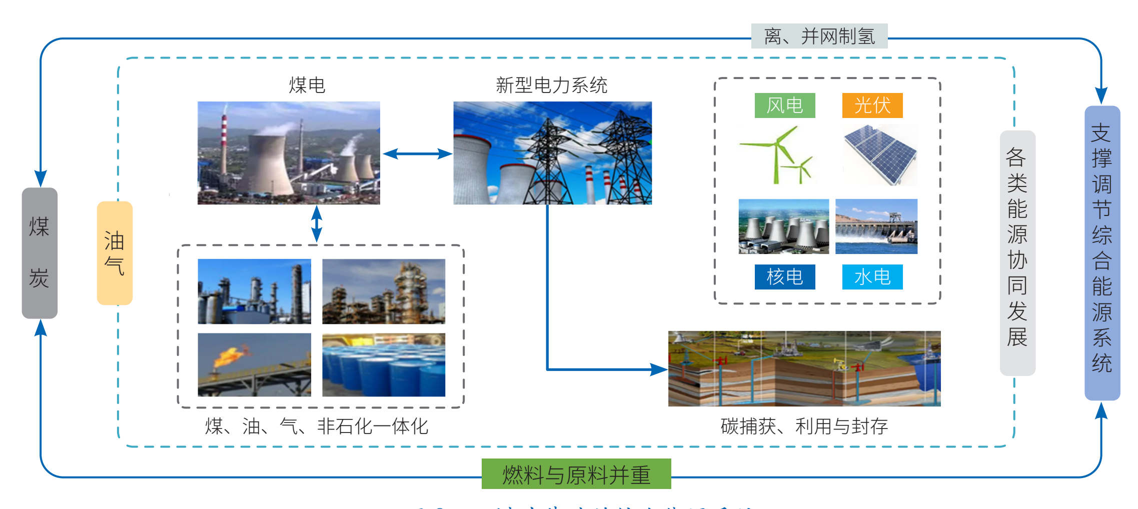


图 8　以煤为基础的综合能源系统
Figure 8　Integrated energy system based on coal

2.2 发展多渠道能源开发和储备

2.2.1 推动煤炭煤电与可再生能源优化组合

煤电与可再生能源优化组合保障供电稳定。与新一代信息技术紧密结合，建设 5G 通信+绿色智能开采、数字孪生智慧矿山、“供应链-物流链”双链融合[15-17]、消费精准预测、多源开放共享的市场交易机制（图 9）的煤炭柔性供给体系（图 10）。该体系与大容量、高参数、低污染的煤电机组及煤电灵活调峰技术，共同弥补可再生能源电力间歇性、随机性和波动性的不足，保障电力系统平稳运行。

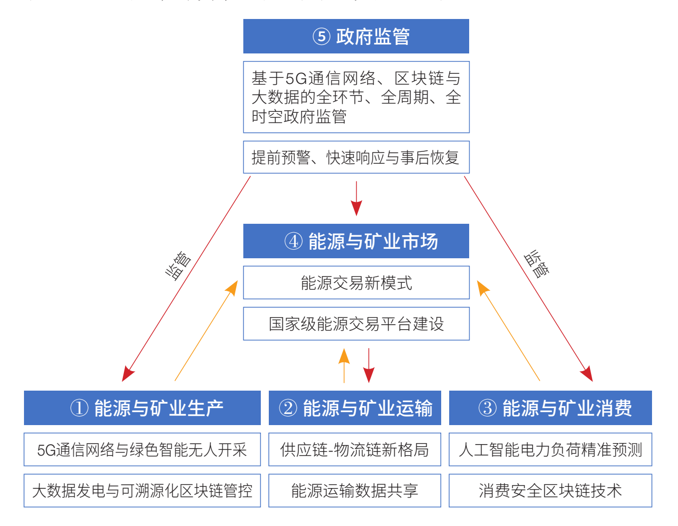


图 9　多源开放共享的市场交易机制
Figure 9　Market trading mechanism of multi-source open sharing

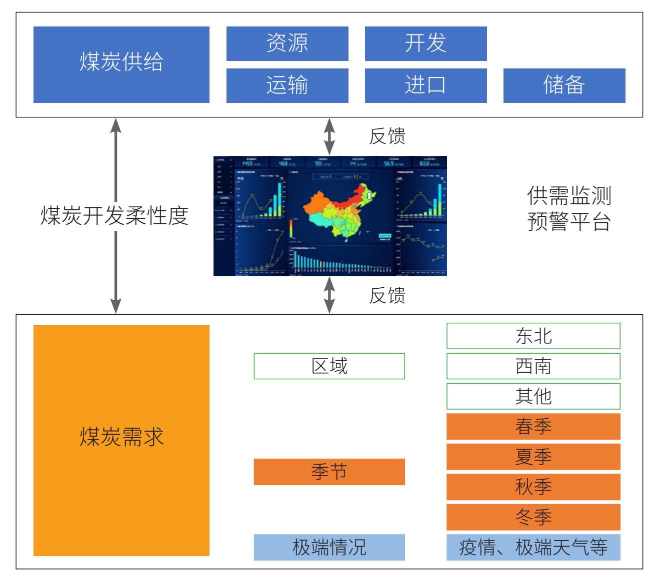


图 10　煤炭柔性供给体系[18]
Figure 10　Flexible coal supply system[18]

研发多项煤电和可再生能源技术。发展煤矿地下水库电力调峰技术、煤与太阳能光热耦合发电技术、煤与风能耦合发电技术、煤与地热能耦合发电/供热技术、可再生能源制氢与煤清洁转化耦合技术等多能耦合开发技术，推动可再生能源与煤化工深度耦合，开展源头减碳、过程减碳、产品固碳技术研发。

2.2.2 加强煤炭智能绿色开发与柔性供给体系建设

建设煤炭智能绿色开发与柔性供给体系，发展智能开发与绿色开采技术。将新一代信息技术与煤炭资源、开发、运输、进口和储备等产业链深度融合，建立以智能化煤矿建设为核心、以数字化为基础的煤炭智能绿色开采与柔性供给体系。

智能开发技术的主要包括：信息技术与煤炭开发融合应用以及地下水保护利用与地表生态修复技术理论研究与技术装备、煤矿工业互联网与大数据技术、4D-GIS 透明地质技术、煤矿 5G 通信技术、井下视频高效处理及增强现实（AR）/虚拟现实（VR）技术、井下精确定位与设备导航技术、重大危险源智能感知与预警预报技术、煤矿机器人长时供电与协同作业技术等。

绿色开采技术的主要包括：基于地下水保护和地表生态减损的煤炭开采工艺及开采参数优化方法，建立针对我国东、中、西部不同采煤区域的地表植被修复技术、星-空-地-井“四位一体”监测技术（图 11），以此建立多源异构矿区生态扰动监测大数据融合处理与知识挖掘理论体系。

2.2.3 加强油气稳增保进与战略储备

大力实施油气稳增保进工程。加大常规油气勘探开发力度，夯实油气上产资源基础；积极扩大非常规和可再生油气资源开发利用，强化资源战略接替；强化老油气田提高采收率工程，夯实稳产基础；强化勘探开发关键技术攻关，努力降低生产成本。

加强颠覆性技术攻关研究，做好规模开发技术储备。加强与南海周边国家战略对接，深化海洋油气资

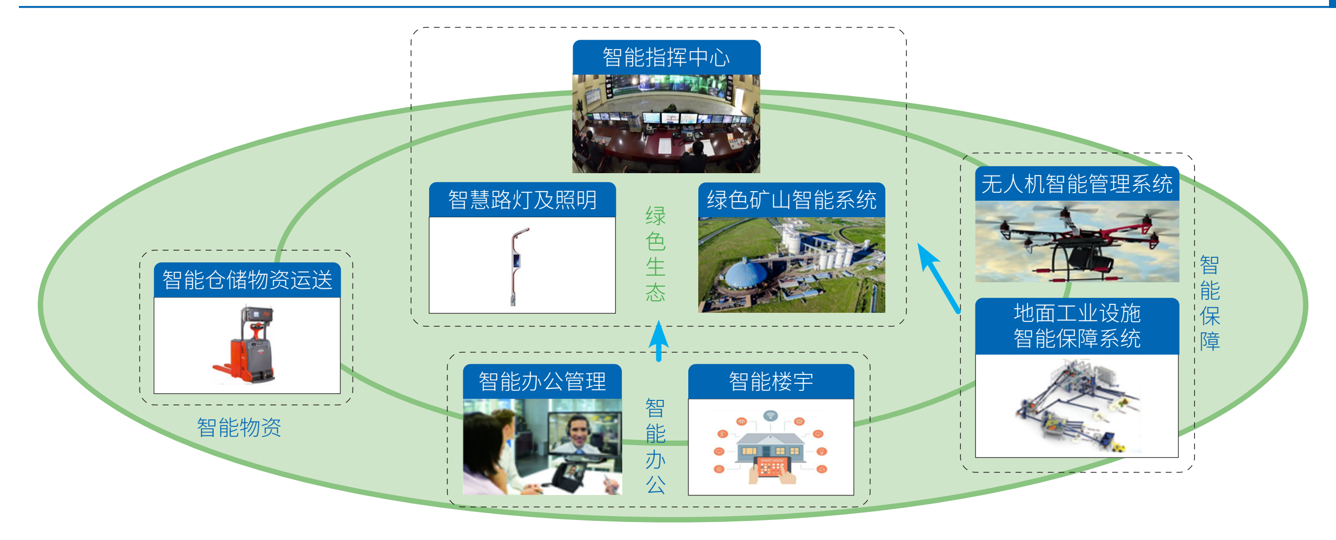


图 11 星 - 空 - 地 - 井“四位一体”监测框架

Figure 11 “Four in one” monitoring framework of satellite-air-ground-well

源开发合作，加大海洋勘探开发核心技术、深水钻采装备攻关。天然气水合物资源潜力巨大，加快水合物开采技术、钻完井技术攻关，突破运输技术、储藏技术等瓶颈技术。

加强油气实物储备能力建设，提升油气应急保供能力。加强石油储备库建设，提升石油应急保障能力；加快储气库建设力度，尽快补齐我国储气能力不足的短板；提升智能化、精细化管理水平，提高油气储备管理效率。

2.2.4 增强煤制油气战略替代能力建设

攻关煤炭清洁转化关键核心技术，提升煤直接替代油气的可靠保障能力。开展深部原位油气热电转化技术攻关，实现煤炭气化技术超大型化，煤炭液化技术大型化和产品多样化，以及煤制清洁燃气关键技术自主化。推动煤转化制化学品大规模发展，加快开发合成气一步法直接制芳烃技术，形成煤制高端精细化学品技术。开展油、气、化多联产的千万吨级煤炭分质利用工业化示范，为煤炭清洁转化大规模替代油气提供技术支撑。

发展煤综合接续替代油气技术，保护煤制油气利润，拓宽替代路径。优化发展煤制氢技术，加快发展氢能储运、氢燃料电池、“煤制氢+碳捕获、利用与封存”技术，强化氢能汽车续航能力。推动煤与可再生能源耦合制氢技术取得重要进展，实现可再生能源制氢与现有煤转化主要工艺路线煤制气、煤制油、煤制甲醇的工艺耦合。为煤制油气企业配套优惠价格煤炭资源，将煤炭适当让利给煤制油气企业。

3 构建能源产业全方位安全观与现代能源矿业治理体系

为实现国家能源产业健康、高质量发展，利用智能矿业、6S①智能化系统[19]、“5G+ABCD”②技术（图 12）支撑体系助力能源产业安全，搭建国家能源与矿业安全生产智能化平台、矿物产品交易与产业协作智能化平台、矿业数据标准与信息安全保障系统，制定现代能源矿业治理体系，全面保障我国能源安全。

3.1 建立能源产业全方位安全观

建立并实施双重预防和安全管控体系，有效控制生

① 6S 是指安全（safety）、可靠（security）、服务（service）、智慧（smartness）、柔性（sensitivity）、可持续（sustainability）。

② 5G 是指 5G 通信网络，ABCD 是指人工智能（artificial intelligence）、区块链（blockchain）、云计算（cloud computing）、大数据（big data）。

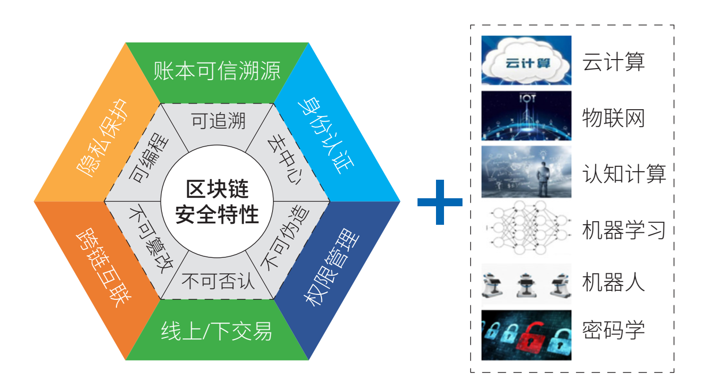


图 12 “5G+ABCD”技术支撑体系

Figure 12 “5G+ABCD” technical support system

产安全风险，形成正确的风险可控的安全生产观。时刻牢记安全红线，均衡各个安全要素。能源产业安全基础体系包含“一个目标，六大体系”。“一个目标”：建立自主可控安全可靠的清洁高效能源供给保障体系。“六大体系”：资源勘探保障体系、国际合作体系、柔性供给体系、智能化生产技术体系、清洁转化利用自主技术体系、产业链自主技术与装备体系。

3.2 建设现代能源与矿业治理体系

3.2.1 现代能源与矿业治理体系平台

将 5G 通信网络、智能云、区块链、大数据等新一代信息技术[15-20]应用到国家能源与矿业管理平台、地方与行业协作监管服务平台和能源矿业企业生产运行治理终端，形成现代能源与矿业治理体系平台（图 13），实现矿业产业全过程的智慧化运行。

3.2.2 现代能源与矿业治理体系平台拓扑图

在能源与矿业生产消费各参与方，部署智能柔性能源终端进行数据信息采集，搭建现代能源与矿业治理体系平台（图 14）。

公转融合的 5G 能源网络。依据信息安全、传输与交互需求，建设公专融合 5G 能源网络[15]（图 15）。5G 能源公网主要实现个人业务、物流等公开广域信息传输；5G 能源专网主要实现能源与矿业生产、消费等信息的局域或安全传输。

能源与矿业大数据人工智能处理平台。构建以智能柔性能源与矿物供给终端为基础的能源与矿业大数据人工智能处理平台（图 16），采集多层次、多特征和多模式数据，统一异构数据存储量化和分布式计算，提供安全生产、储装运、高效转化、消费需求精准分析及预测，支撑现代能源与矿业智能柔性开发供给体系高效可靠运行，实现对能源生产交易数据的有效分析。

区块链能源与矿业产业协作监管平台。依据参与

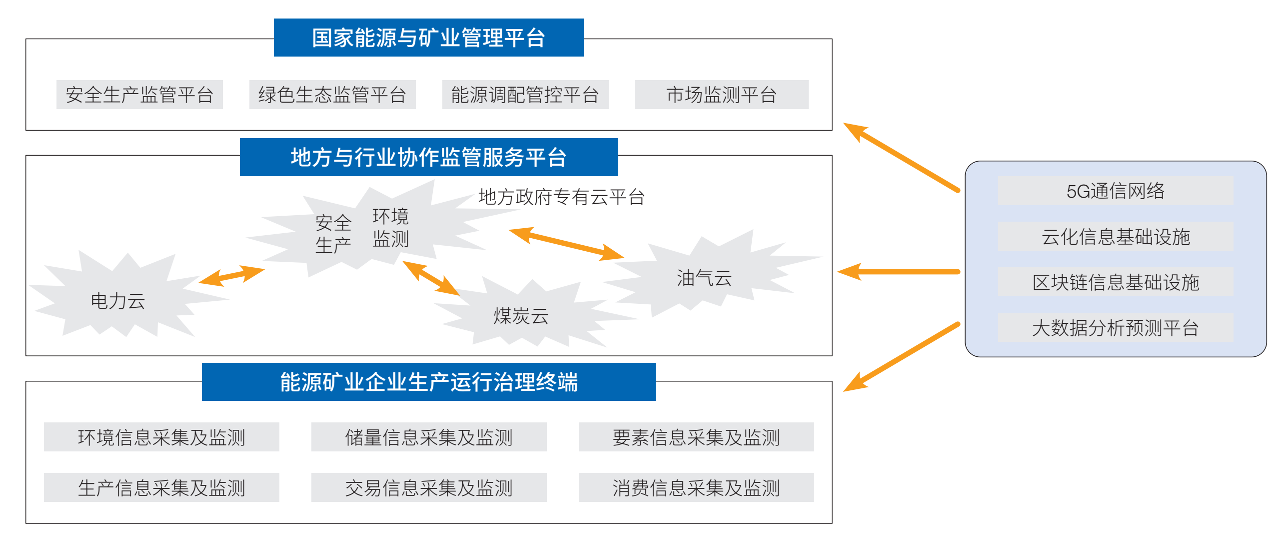


图 13 现代能源与矿业治理体系平台

Figure 13 Modern energy and mining governance system platform

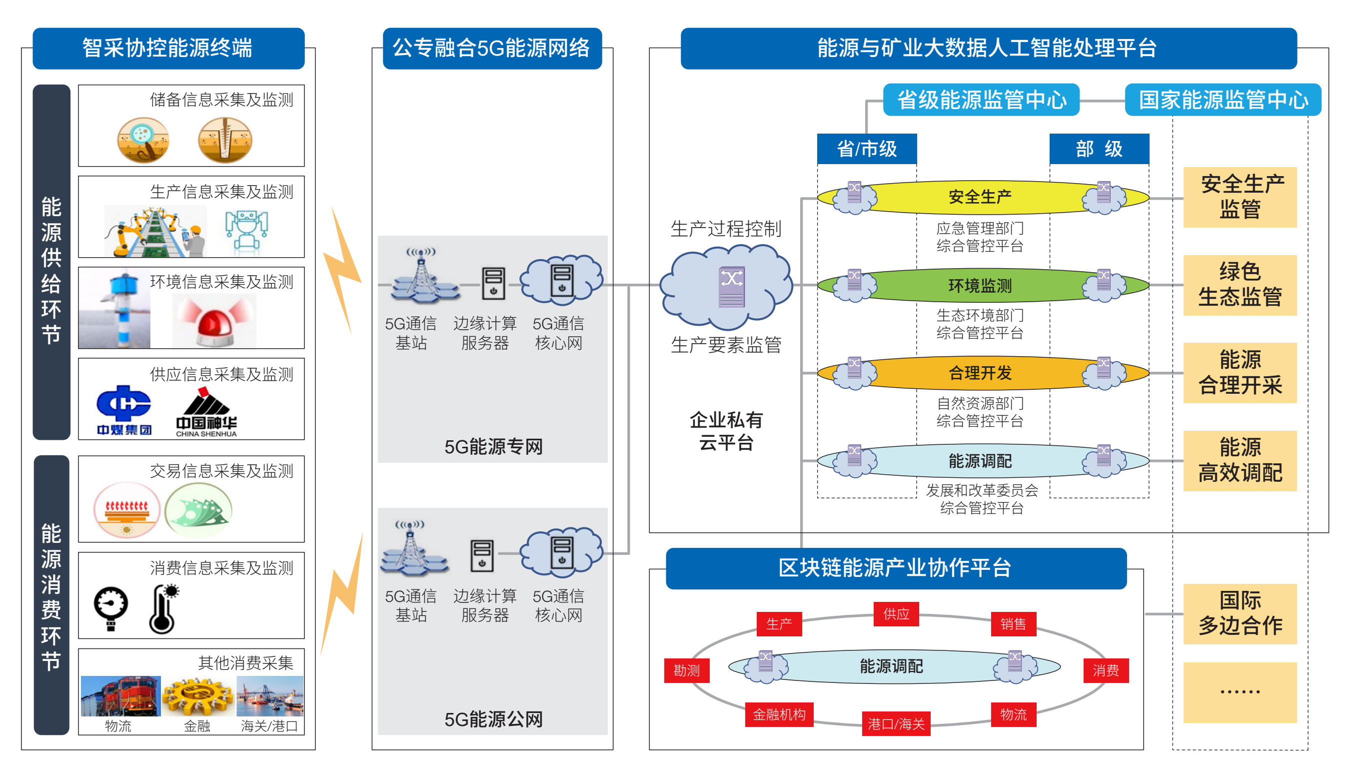


图 14　现代能源与矿业治理体系平台拓扑图

Figure 14　Topology diagram of modern energy and mining governance system platform

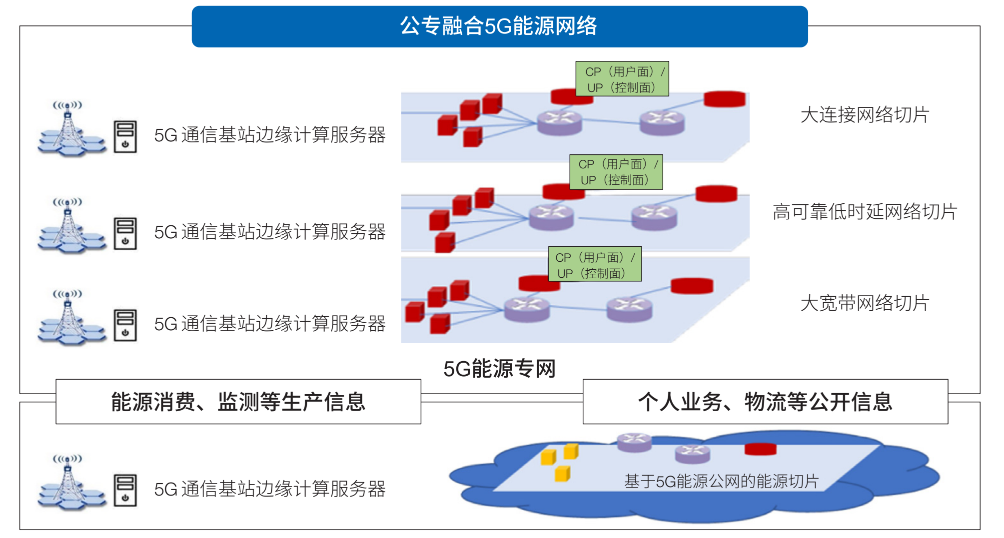


图 15　公专融合 5G 能源网络建设

Figure 15　5G energy network construction integrating public and private sectors

方角色分别建立能源生产、销售、消费子链，通过接入网关实现区块联盟链，实现国内外能源与矿业自由交易及监管数据的可信记录。物流服务、银行金融、海关/港口等子链也通过网关接入能源区块链平台，并形成现有区域/行业的能源交易联盟链。通过接入国际网关，将国际能源交易联盟链也接入能源区块链平台，为国家监控提供数据接口（图 17）。

*建设涵盖能源与矿业生产交易各环节的省级管控平台、国家级监管中心。*助力企业实现科学微观管理，增强政府相关管理部门之间的协同（图 18），解

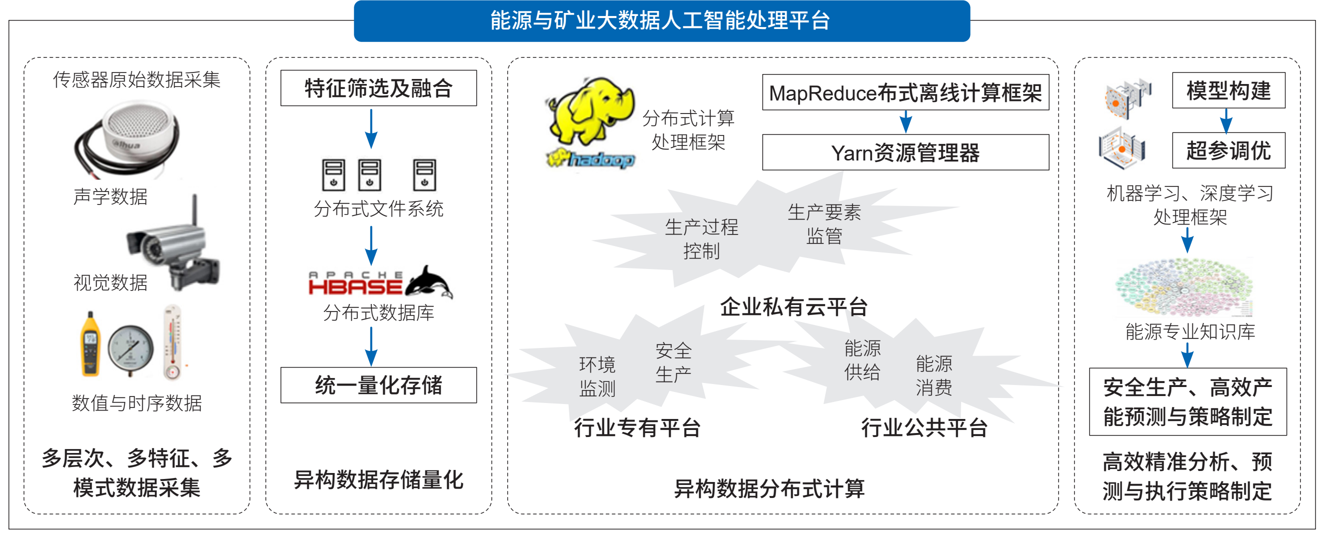


图 16　能源与矿业大数据人工智能处理平台

Figure 16　Energy and mining big data and artificial intelligence processing platform

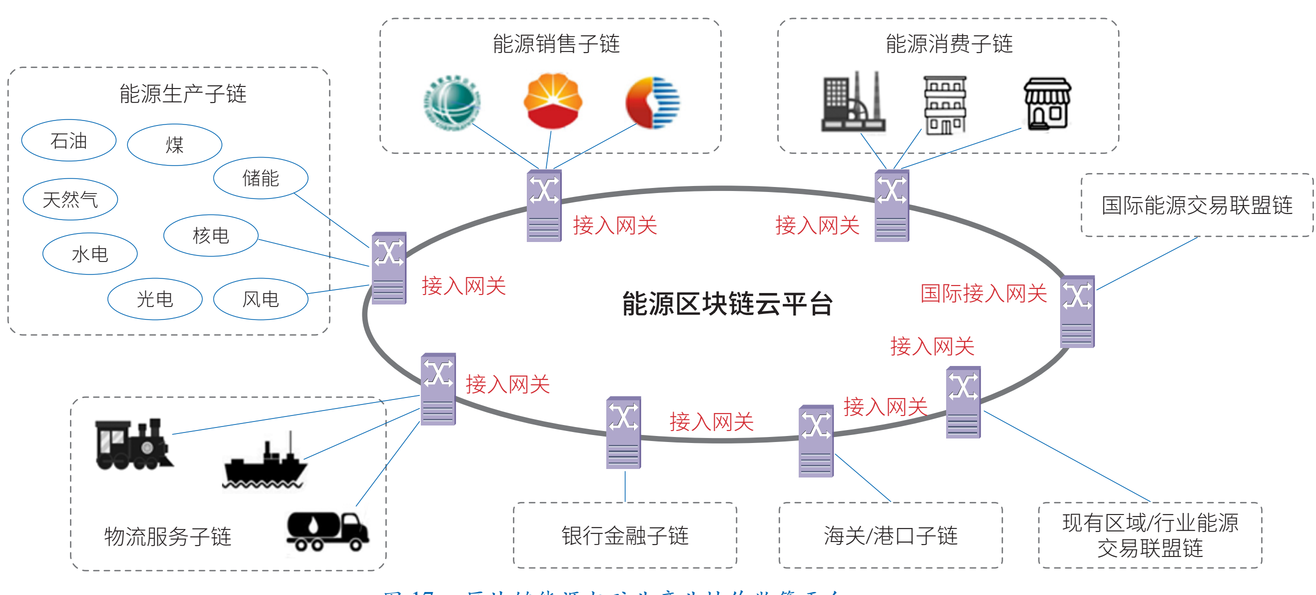


图 17　区块链能源与矿业产业协作监管平台

Figure 17　Blockchain energy and mining industry cooperation supervision platform

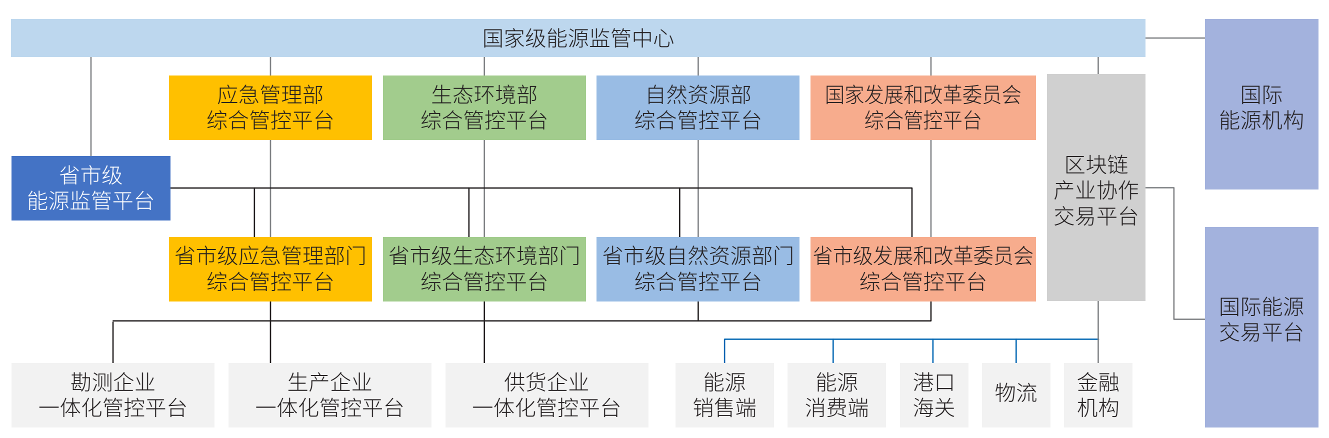


图 18　国家级监管中心

Figure 18　National regulatory center

决能源监管缺位错位难题，保障能源安全生产等。打造区块链产业协作平台，打通产业链合作瓶颈，加强市场引导力度；同时，与国家能源机构、能源与矿业交易平台建立互通手段，增强我国能源与矿业国际话语权[17]。

3.2.3 国家级能源交易平台

以服务实体经济、搭建国际化能源交易平台为目标，运用5G通信、大数据、人工智能、区块链等新技术，创建先进的电子交易系统平台。实现国际化能源交易平台建设，突破交易信息的快速共享技术，通过先进的5G通信技术和全面感知技术，实现能源大数据的快速采集、传输和智能信息处理；突破各市场主体的科学决策辅助技术，通过人工智能等技术，为政府以及各市场主体的科学决策提供有益分析和参考决策。

参考文献

1 王国法. “双碳”目标下，煤炭工业如何应对新挑战. 中国煤炭报, 2021-09-23(03).

Wang G F. Under the target of “double carbon”, how does the coal industry cope with new challenges. China Coal News, 2021-09-23(03). (in Chinese)

2 王国法, 李世军, 张金虎, 等. 筑牢煤炭产业安全奠定能源安全基石. 中国煤炭, 2022, 48(7): 1-9.

Wang G F, Li S J, Zhang J H, et al. Ensuring the safety of coal industry to lay the cornerstone of energy security. China Coal, 2022, 48(7): 1-9. (in Chinese)

3 王国法. “十四五”煤矿智能化和煤炭高质量发展的思考. 智能矿山, 2021, 2(1): 1-6.

Wang G F. Thoughts on intelligentization of coal mines and high-quality development of coal in the Fourteenth Five-Year Plan. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 1-6. (in Chinese)

4 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130-138.

Kang H P, Wang G F, Wang S M, et al. High-quality development of China’s coal industry. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138. (in Chinese)

5 王国法. 加快煤矿智能化建设 推进煤炭行业高质量发展. 中国煤炭, 2021, 47(1): 2-10.

Wang G F. Speeding up intelligent construction of coal mine and promoting high-quality development of coal industry. China Coal, 2021, 47(1): 2-10. (in Chinese)

6 刘峰, 曹文君, 张建明. 持续推进煤矿智能化，促进我国煤炭工业高质量发展. 中国煤炭, 2019, 45(12): 32-36.

Liu F, Cao W J, Zhang J M. Continuously promoting the coal mine intellectualization and the high-quality development of China’s coal industry. China Coal, 2019, 45(12): 32-36. (in Chinese)

7 王旭东. 我国煤炭行业高质量发展指标体系及基本路径研究. 中国煤炭, 2020, 46(2): 22-27.

Wang X D. Study on high quality development index system and basic path of coal industry in China. China Coal, 2020, 46(2): 22-27. (in Chinese)

8 王国法, 范京道, 徐亚军, 等. 煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望. 工矿自动化, 2018, 44(2): 5-12.

Wang G F, Fan J D, Xu Y J, et al. Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5-12. (in Chinese)

9 张建明, 曹文君, 王景阳, 等. 智能化煤矿信息基础设施标准体系研究. 中国煤炭, 2021, 47(11): 1-6.

Zhang J M, Cao W J, Wang J Y, et al. Research on information infrastructure standard system for intelligent coal mine information infrastructure. China Coal, 2021, 47(11): 1-6. (in Chinese)

10 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策. 工矿自动化, 2021, 47(6): 1-11.

Wang G F, Ren H W, Zhao G R, et al. Analysis and countermeasures of ten ‘pain points’ of intelligent coal mine. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1-11. (in Chinese)

11 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.

Wang G F. New technological progress of coal mine intelligence and its problems. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27. (in Chinese)

12 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025年中国能源消费及煤炭需求预测. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949-1960.

Xie H P, Wu L X, Zheng D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960. (in Chinese)

13 谢和平, 任世华, 吴立新. 煤炭碳中和战略与技术路径. 北京: 科学出版社, 2022.

Xie H P, Ren S H, Wu L X. Coal Carbon Neutralization Strategy and Technology Path. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)

14 S.弗雷德·辛格, 丹尼斯·T. 艾沃利. 全球变暖：毫无来由的恐慌. 林文鹏, 王臣立, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2008.

Singer S F, Avery D T. Global Warming: Unreasonable Panic. Translated by Lin W P, Wang C L. Shanghai: Shanghai Science and Technology Literature Press, 2008. (in Chinese)

15 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G技术在煤矿智能化中的应用展望. 煤炭学报, 2020, 45(1): 16-23.

Wang G F, Zhao G R, Hu Y H. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16-23. (in Chinese)

16 Li Z, Barenji A V, Huang G Q. Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 54: 133-144.

17 张妍, 王龙泽, 吴靖, 等. 区块链与综合能源系统：应用及展望. 中国科学基金, 2020, 34(1): 31-37.

Zhang Y, Wang L Z, Wu J, et al. Blockchain and integrated energy system: Application and prospect. Bulletin of National Science Foundation of China, 2020, 34(1): 31-37. (in Chinese)

18 王国法, 赵路正, 庞义辉, 等. 煤炭智能柔性开发供给体系模型与技术架构. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 1-10.

Wang G F，Zhao L Z, Pang Y H, et al. Model and technical framework of smart flexible coal development-supply system. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 1-10. (in Chinese)

19 王国法, 杜毅博, 庞义辉. 6S智能化煤矿的技术特征和要求. 智能矿山, 2022, 3(1): 2-13.

Wang G F, Du Y B, Pang Y H. Technical characteristics and requirements of 6S intelligent coal mine. Journal of Smart Mine, 2022, 3(1): 2-13. (in Chinese)

20 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14.

Yang T, Zhao L Y, Wang C S. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14. (in Chinese)

High-quality Energy Development and Energy Security under the New Situation for China

WANG Guofa[1,2,3*] LIU He[4] WANG Dandan[3] PANG Yihui[5] WU Lixin[6]

(1 China Coal Technology & Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100013, China;
2 China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;
3 Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co. Ltd., Beijing 101399, China;
4 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
5 CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China;
6 CCTEG Coal Industry Planning Institute, Beijing 100120, China)

Abstract Energy security is the cornerstone of national security and stable development, and high-quality energy development is the fundamental guarantee for long-term national economic growth. This study analyzes the complicated domestic and international environmental impacts of the ongoing Russia-Ukraine war, the United States energy rule, and the rigid demand for domestic energy consumption growth. It also analyzes the uncertainty of domestic energy transformation and development. Then, the study summarizes the enlightenment of China's energy development. Furthermore, based on China's energy structure and resource endowment, this study establishes an independent, controllable, safe and reliable integrated energy security system based on fossil energy, and develops multi-channel energy development and energy reserves. Strategic ideas and technical routes to support low-carbon development of energy transformation are formulated simultaneously. This study also proposes the establishment of modern energy and mining governance system platform, topology and composition: 5G energy private network, energy and mining big data and artificial intelligence processing platform, blockchain energy and mining industry cooperation supervision platform, provincial and national supervision center. Logically, this study promotes the establishment of an all-round security concept for the energy industry and a modern energy mining governance system, so as to ensure China's high-quality energy development and energy security.

Keywords energy security, high-quality development, comprehensive energy safeguard system, all-round security concept, energy and mining management

王国法 中国工程院院士。中国煤炭科工集团有限公司科技委副主任、首席科学家，中国煤炭科工集团有限公司煤矿智能化工作委员会主任。中国自动化学会智慧矿山专业委员会主任。煤炭开采技术装备与智能矿山科技领军者。
E-mail: wangguofa@tdkcsj.com

WANG Guofa Academician of the Chinese Academy of Engineering, Deputy Director and Chief Scientist of the Science and Technology Commission of China Coal Technology & Engineering Group Co. Ltd., Director of the Coal Mine Intelligence Working Committee of China Coal Technology & Engineering Group Co. Ltd., and Director of Smart Mine Professional Committee of Chinese Association of Automation. He is the leader of coal mining technical equipment and smart mine technology. E-mail: wangguofa@tdkcsj.com

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author